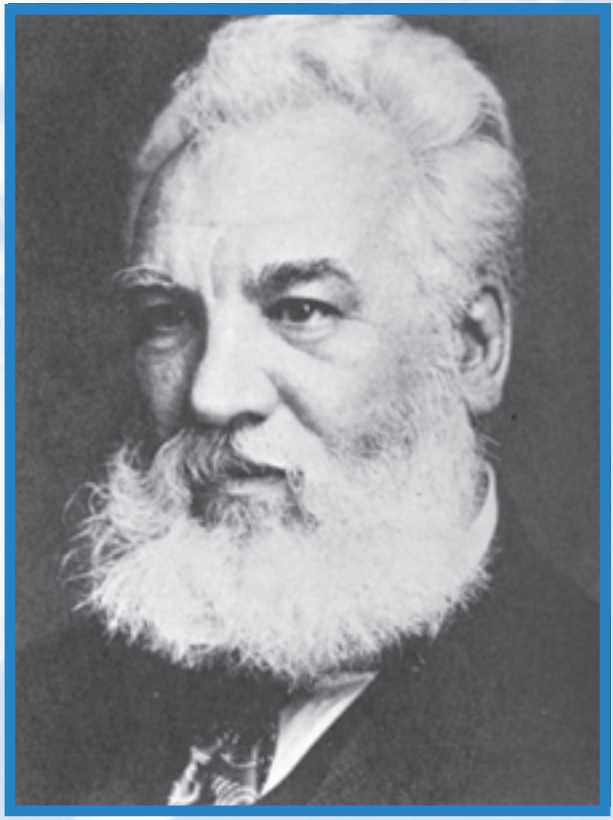
فیزیک ۲

۱

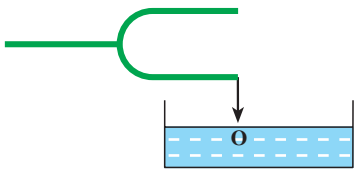
موج‌های مکانیکی (۲)



الکساندر گراهام بل
(۱۸۴۷ـ۱۹۲۲م)

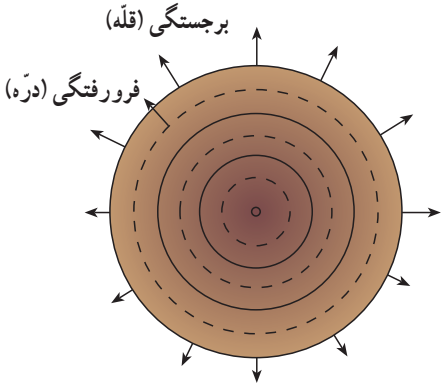
موج‌های مکانیکی (۲)

۱ــ۱ــ انتشار موج در دو و سه بُعد



شکل ۱ــ۱

اگر مطابق شکل ۱ــ ۱ به کمک یک سوزنی که به انتهای یک شاخه‌ی دیاپازون نصب شده است، ضربه‌هایی را در راستای قائم بر سطح آب درون تشتک وارد کنیم، موج‌های ایجاد شده به صورت دایره‌هایی به مرکز چشمه‌ی موج، در سطح آب، یعنی در دو بُعد منتشر می‌شوند.

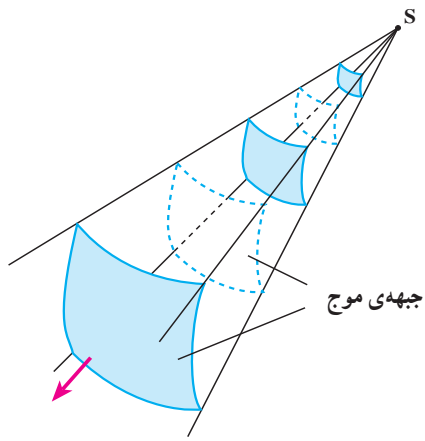


شکل ۱ــ۲

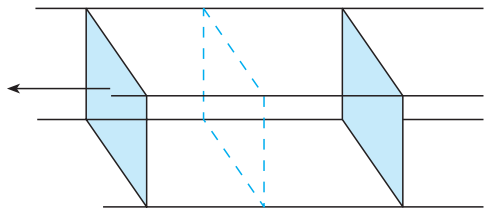
در شکل ۱ــ۲ دو دسته دایره می‌بینید. دایره‌های توپر، برجستگی‌ها و دایره‌های خط‌چین، فرورفتگی‌ها را در سطح آب نشان می‌دهند. به این دایره‌های درحال انتشار **جبهه‌ی موج** می‌گوییم و آن را چنین تعریف می‌کنیم : **جبهه‌ی موج مکان هندسی نقطه‌هایی از محیط است که در آن نقطه‌ها تابع موج دارای فاز یکسانی است.** بنابراین، اختلاف فاز نقطه‌های واقع بر یک جبهه‌ی موج همواره برابر صفر است.

موج‌های سطح آب، نمونه‌ای از انتشار موج در دو بُعد است. موج‌هایی نیز هستند که در سه بعد منتشر می‌شوند ؛ انتشار موج‌های صوتی و انتشار موج‌های الکترومغناطیسی، نمونه‌هایی از انتشار موج در سه بُعدند. اگر یک چشمه‌ی موج نقطه‌ای را در یک محیط همسانگرد سه‌بُعدی قرار دهیم (مثلاً بلندگوی کوچکی در هوای درون اتاق)، جبهه‌ی موج به‌صورت کره‌هایی خواهد بود که مرکز همه‌ی آن‌ها، چشمه‌ی موج است و از چشمه‌ی موج در سه بُعد منتشر می‌شوند و شعاع آن‌ها با انتشار موج به‌تدریج افزایش می‌یابد. به این موج‌ها، موج کروی می‌گوییم. شکل ۱ــ۳ قسمت‌های کوچکی از سطح موج‌ها را که از چشمه‌ی موج نقطه‌ای S گسیل می‌شوند نشان می‌دهد.

در فاصله‌ی بسیار دور از یک چشمه‌ی موج نقطه‌ای، قسمت‌های کوچکی از جبهه‌ی موج‌های کروی، همان‌گونه که در شکل ۱ــ ۴ نشان داده شده است، به‌صورت صفحه‌هایی موازی یک‌دیگر درمی‌آیند. در این صورت به آن‌ها **موج تخت** می‌گوییم.



شکل ۱ــ۳ــ موج‌های کروی



شکل ۱ــ۴ــ موج‌های تخت

موج حامل انرژی است: موج‌ها با خود انرژی را از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر منتقل می‌کنند. اگر یک سر طنابی در دست شما باشد و از سر دیگر آن موجی به طرف شما منتشر شود، وقتی موج به‌دست شما می‌رسد، ضربه‌ی موج می‌خواهد طناب را از دست شما خارج کند.

در فیزیک ۱دیدیم که هر نوسانگری دارای انرژی است. از طرف دیگر می‌دانیم موج به‌هر ذرّه‌ی محیط که می‌رسد، آن ذره را با بسامدی برابر بسامد موج به نوسان وامی‌دارد، به عبارت دیگر موج به هر ذره‌ی محیط که می‌رسد به آن انرژی منتقل می‌کند. از سوی دیگر می‌دانیم که انرژی مکانیکی نوسانگری به جرم m که با دامنه‌ی A و بسامد f نوسان می‌کند برابر است با :

$$E = \frac{۱}{۲} m\omega^{۲} A^{۲}$$

با توجه به این که $\omega = 2\pi f$ است، داریم :

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2 \qquad (۱ــ۱)$$

چون هر ذره‌ی محیط، حرکت نوسانی ساده با بسامد موج انجام می‌دهد ؛ بنابراین، انرژی مکانیکی هر ذره نیز از رابطه‌ی ۱ــ۱ محاسبه می‌شود.

رابطه‌ی ۱ــ۱ نشان می‌دهد که : **انرژی‌ای که توسط موج حمل می‌شود هم با مجذور دامنه و هم با مجذور بسامد موج، نسبت مستقیم دارد.**

در لحظه‌ای که قلّه‌ی موج به یک ذرّه از محیط می‌رسد، تمام انرژی ذرّه به‌صورت انرژی پتانسیل است، و وقتی که ذرّه از وضع تعادل می‌گذرد، تمام انرژی آن به‌صورت جنبشی خواهد بود.

بازتاب موج: فرض کنید موجی در یک محیط در حال انتشار است. به نظر شما وقتی این موج به انتهای محیط، یعنی مرز این محیط با محیط دیگر می‌رسد، چه پدیده‌ای رخ می‌دهد؟

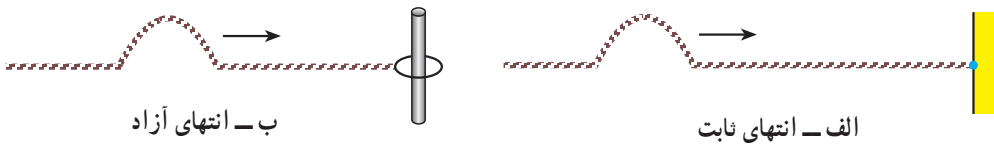
وقتی موج، به انتهای محیط می‌رسد، مقداری از انرژی این موج از مرز مشترک دو محیط عبور می‌کند و وارد محیط دوم می‌شود و بقیه‌ی آن از مرز مشترک بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد.

برای بررسی پدیده‌ی بازتاب، باید اولاً، فرض کنیم که تمام انرژی موج از مرز مشترک دو محیط بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد ؛ ثانیاً، اصطکاک ناچیز است و انرژی موج هم تلف نمی‌شود. این بررسی ساده‌تر و آموزنده است.

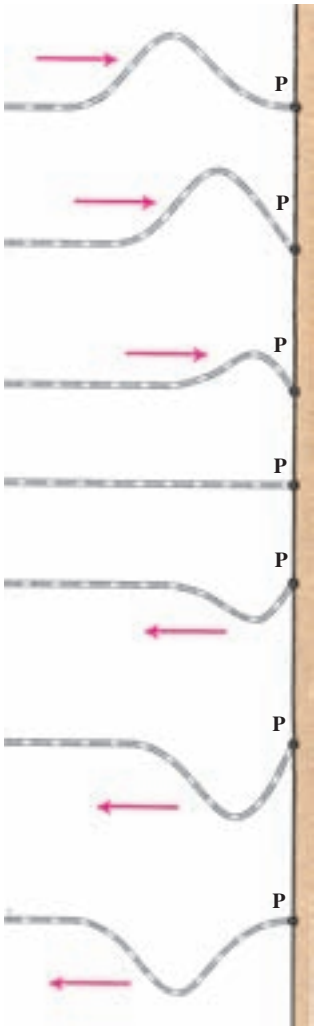
نتیجه‌ی به‌دست آمده در این مورد و در مورد دیگر موج‌های مکانیکی، نظیر موج‌های صوتی و موج‌های الکترومغناطیسی، نیز درست است.

بازتاب تپ (موج) از انتهای طناب به نحوه‌ی اتصال انتهای طناب بستگی دارد. انتهای طناب، ممکن است به یک دیوار، محکم ثابت شده باشد. در این صورت، انتهای طناب را **انتهای ثابت یا بسته** می‌نامیم (شکل ۱ــ۵ــ الف) و هم‌چنین ممکن است انتهای طناب به حلقه‌ی بسیار سبکی وصل شده باشد و روی میله‌ی قائمی بدون اصطکاک بتواند، بالا و پایین برود (شکل ۱ــ۵ــ ب). در این حالت، انتهای طناب **انتهای آزاد** نامیده می‌شود.

بدین ترتیب، انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، درصورتی که انتهای آزاد برای نوسان آزاد است.



شکل ۱ــ۵

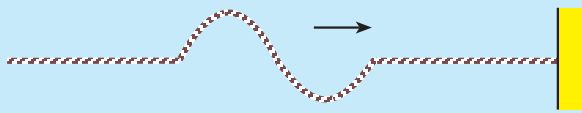


بازتاب از انتهای ثابت: وقتی تپ مطابق شکل ۱ــ۶ به انتهای ثابت P می‌رسد، جزء کوچکی از طناب که در مجاورت نقطه‌ی P قرار دارد، به آن نیرویی رو به بالا وارد می‌کند تا نقطه‌ی P را به نوسان وادارد. نقطه‌ی P از طناب، روی دیوار ثابت است و نمی‌تواند جابه‌جا شود. بنا به قانون سوم نیوتون، نقطه‌ی P (انتهای ثابت) به طناب، نیرویی رو به پایین وارد می‌کند. این، درست مانند آن است که انتهای طناب را با دست گرفته و رو به پایین بکشیم و در آن تپی رو به پایین ایجاد کنیم. یعنی، انتهای ثابت، در بازتاب تپ، مانند یک چشمه‌ی موج عمل می‌کند و یک تپ در خلاف جهت تپ تابشی (فرودی) در طناب ایجاد می‌کند که برجستگی را به فرورفتگی و فرورفتگی را به برجستگی تبدیل می‌کند (به حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۶ توجه کنید). تپ باز تابیده، در خلاف جهت تپ تابشی، روی طناب منتشر می‌شود.

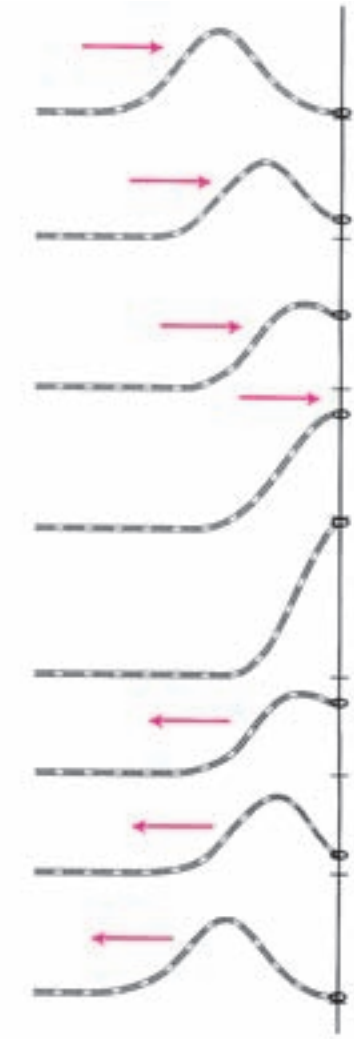
شکل ۱ــ۶ــ انتهای طناب ثابت است.

تمرین ۱ــ۱

در شکل ۱ــ۷ تپی روی طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتاب آن را از انتهای ثابت طناب، رسم کنید.



شکل ۱ــ۷

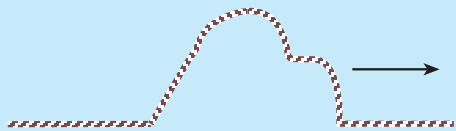


بازتاب از انتهای آزاد: اگر انتهای طناب آزاد باشد، وقتی تپ به آن می‌رسد، انتهای طناب را در جهت خود به‌حرکت درمی‌آورد. در شکل ۱ــ۸ تپ تابشی، انتهای طناب را بالا می‌کشد. در این حالت همان طور که شکل نشان می‌دهد، انتهای طناب به قلّه‌ای می‌رسد که جابه‌جایی آن از وضع تعادل، دو برابر جابه‌جایی سایر نقطه‌های طناب است. در این حالت، انتهای طناب، مانند چشمه‌ی موجی عمل می‌کند که در طناب، تپی در جهت تپ تابشی ایجاد می‌کند که در خلاف جهت آن در طناب منتشر می‌شود. درست مانند آن که انتهای طناب را با دست گرفته و بالا برده و به‌جای اول برگردانیم ؛ بنابراین، در انتهای آزاد، برجستگی به‌صورت برجستگی و فرورفتگی به‌صورت فرورفتگی، بازتاب می‌شود.

شکل ۱ــ۸ــ انتهای طناب آزاد است.

تمرین ۱ــ۲

تپی مانند شکل ۱ــ ۹ در طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتابی آن را از انتهای آزاد طناب، رسم کنید.



شکل ۱ ــ۹

۱ــ۲ــ اصل برهم نهی موج‌ها

وقتی در یک مکان شلوغ و پُر سر و صدا در حال حرکت هستید، صداهای مختلفی از چشمه‌های صوتی متفاوت به گوش شما می‌رسد. هرچند انسان قادر است، گوش خود را روی صدای خاصی متمرکز کند و آن صدا را بشنود، اما صداهای مختلف همگی و با هم در هوا منتشر می‌شوند و انتشار یک صوت، مانع انتشار صوت‌های دیگر نمی‌شود.

به شکل ۱ــ۱۰ نگاه کنید، در سطح آب دریاچه، موج‌هایی هم‌زمان در حال انتشارند. این موج‌ها، هر یک به‌طور مستقل به انتشار خود ادامه می‌دهند.

شکل ۱ــ۱۰

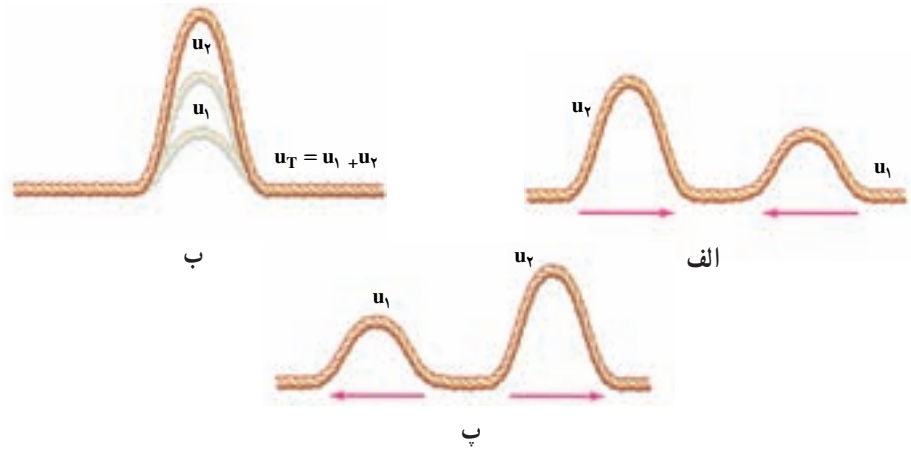
مثال‌های بالا به‌طور عملی نشان دهنده‌ی اصلی به‌نام **اصل برهم نهی** هستند. مطابق این اصل :

هر موج در حال انتشار، بدون آن که برای انتشار سایر موج‌ها مزاحمتی ایجاد کند، از آن‌ها عبور کرده و به انتشار خود ادامه می‌دهد. درست مانند آن که هیچ موج دیگری در محیط منتشر نمی‌شود. در نقطه‌ای که دو و یا چند موج با هم تلاقی می‌کنند، جابه‌جایی ذرّه‌ای از محیط که در آن نقطه است، برابر برایند جابه‌جایی‌های حاصل از هر یک از موج‌هاست.

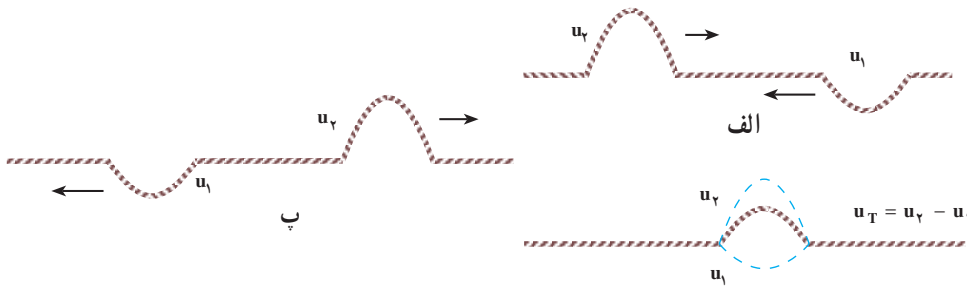
$$\vec{u}_T = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \ldots \qquad (۲ــ۱)$$

به حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۱ نگاه کنید. در حالت (الف) دو تپ عرضی در طول طناب به‌طرف یک‌دیگر در حال انتشارند. این دو تپ در حالت (ب) به یک‌دیگر رسیده‌اند و چون جابه‌جایی حاصل از دو تپ، هم‌جهت‌اند، برآیند آن‌ها برابر مجموع اندازه‌ی جابه‌جایی‌های حاصل از هریک شده است. در حالت (ب) می‌گوییم : **برهم نهی موج‌ها سازنده است**. در حالت (پ) دو تپ از یک‌دیگر عبور کرده و به انتشار خود ادامه داده‌اند.

در حالتی که جابه‌جایی‌ها در خلاف جهت یک‌دیگر باشند جابه‌جایی برایند برابر تفاضل اندازه‌ی جابه‌جایی‌هایی است که هر تپ به تنهایی در جزیی از طناب که با هم به آن رسیده‌اند، ایجاد می‌کند. به حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۲ توجه کنید. در حالت (ب) می‌گوییم : **برهم نهی موج‌ها، ویرانگر است.**



شکل ۱ــ۱۱

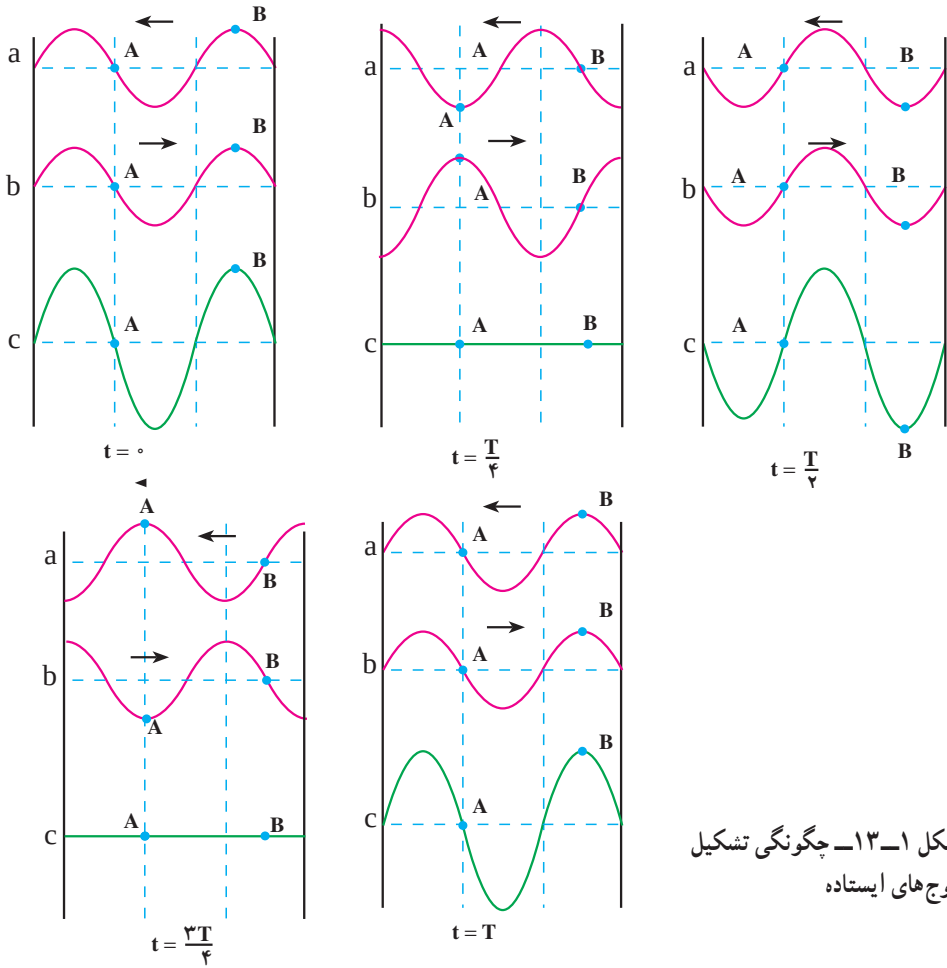


شکل ۱ــ۱۲

برهم نهی موج‌ها در یک بُعد؛ موج‌های ایستاده: فرض کنید که دو چشمه‌ی موج با دامنه و بسامد یکسان A و f یکی در ابتدا و دیگری در انتهای یک طناب کشیده شده، شروع به نوسان کرده و نوسان‌هایی هم راستا ایجاد کنند. موج‌های حاصل از این دو چشمه‌ی یکسان، به سوی یک‌دیگر، منتشر می‌شوند. وقتی هریک از دو موج در تمام طول طناب گسترده شده باشد، به هر جزء طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد. بنا به اصل برهم نهی، جابه‌جایی هر جزء طناب در هر لحظه، برابر برایند جابه‌جایی‌هایی است که هریک از دو موج در آن لحظه در آن جزء ایجاد می‌کنند. وضعیت نوسانی هر نقطه بستگی به مکان آن نقطه در طناب دارد. از برهم نهی چنین دو موجی در طناب، شکل خاصی به‌وجود می‌آید که به آن **موج ایستاده** گفته می‌شود.

گره و شکم: به بعضی از نقطه‌های طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد که در آن نقطه جابه‌جایی‌های یکسان اما در خلاف جهت ایجاد می‌کنند. درنتیجه برهم نهی دو موج در چنین نقطه‌هایی ویرانگر و جابه‌جایی آن‌ها از وضع تعادل صفر است. به این نقطه‌ها که همواره ساکن می‌مانند **گره** می‌گویند و آن‌ها را با N نشان می‌دهند. جای گره‌ها در طول طناب، ثابت است.

به حالت‌های مختلف شکل ۱ــ ۱۳ توجه کنید. در این حالت‌ها و در هریک از لحظه‌های مشخص شده، موجی را که از راست به چپ روی طناب منتشر می‌شود با a و موجی را که از چپ به راست در حال انتشار است با b و حاصل برهم نهی این دو موج را با c نشان داده و هر یک را جداگانه رسم کرده‌ایم. در واقع، حالت‌های c وضعیت طناب را هنگامی که موج‌های a و b روی آن منتشر می‌شوند، در بازه‌های زمانی $\frac{T}{۴}$ (T دوره‌ی موج است) نشان می‌دهد.



شکل ۱ــ۱۳ــ چگونگی تشکیل موج‌های ایستاده

در حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۳ به نقطه‌ی A توجه کنید. موج‌های a و b در هر لحظه به این نقطه، جابه‌جایی‌هایی هم اندازه اما در خلاف جهت می‌دهند. درنتیجه، همان‌گونه که حالت‌های c در لحظه‌های مختلف نشان می‌دهد، نقطه‌ی A همواره ساکن می‌ماند. نقطه‌ی A یک گره است.

پرسش ۱ــ۱

در شکل ۱ــ۱۳ گره‌های دیگری نیز وجود دارند. آن‌ها را مشخص کنید.

به بعضی نقطه‌های دیگر طناب نیز در هر لحظه دو موج می‌رسد، با این تفاوت که در این نقطه‌ها برهم نهی به‌گونه‌ای است که باعث می‌شود موج برآیند، با بیشینه‌ی دامنه نوسان کند. به این نقطه‌ها **شکم، یا پادگره**، می‌گویند و آن‌ها را با A نشان می‌دهند. جای شکم‌ها نیز، مانند گره‌ها، ثابت است. در حالت‌های مختلف شکل ۱ــ ۱۳ یکی از شکم‌ها را با نام B مشخص کرده‌ایم. نقطه‌ی B در مکانی واقع شده است که برهم نهی حاصل از دو موج a و b آن را با بیشینه‌ی دامنه به نوسان وا می‌دارد. نقطه‌ی B یک شکم است.

پرسش ۱ــ۲

آیا در حالت‌های مختلف شکل ۱ــ ۱۳ شکم دیگری نیز وجود دارد؟ اگر پاسخ شما مثبت است، آن را مشخص کنید.

محاسبه نشان می‌دهد که وقتی در طنابی یک موج ایستاده تشکیل می‌شود، فاصله‌ی دو گره‌ی متوالی برابر فاصله‌ی دو شکم متوالی و برابر نصف طول موج است. همچنین فاصله‌ی یک گره و شکم متوالی برابر ربع طول موج است. به همین دلیل برای آن که موج ایستاده در طناب ایجاد شود باید بین طول طناب و طول موج رابطه‌ی معینی برقرار باشد. این رابطه به بسامد نوسان‌ها، سرعت انتشار موج در طناب (درنتیجه به نیروی کشش طناب و جرم واحد طول آن) و طول طناب بستگی دارد. علاوه‌بر این کمیت‌ها، این رابطه به ثابت و یا آزاد بودن انتهای طناب نیز بستگی دارد. در ادامه سعی می‌کنیم این رابطه را به دست آوریم.

یکی از روش‌های ایجاد دو موجِ کاملاً یکسان که در خلاف جهت یک‌دیگر در طناب کشیده شده منتشر شوند، آن است که یک‌سر طناب را به کمک یک دیاپازون به نوسان درآوریم. این نوسان‌ها از انتهای طناب، بازتاب شده و با موج‌های فرودی بر هم‌نهاده می‌شوند و موج ایستاده را به‌وجود می‌آورند. برای بررسی، دو حالت الف : دو سر طناب ثابت و ب : یک سر ثابت و سر دیگر آزاد را درنظر می‌گیریم. در این بررسی‌ها فرض شده که تعداد گره‌ها و شکم‌ها در طول طناب کم‌ترین تعداد ممکن باشد.

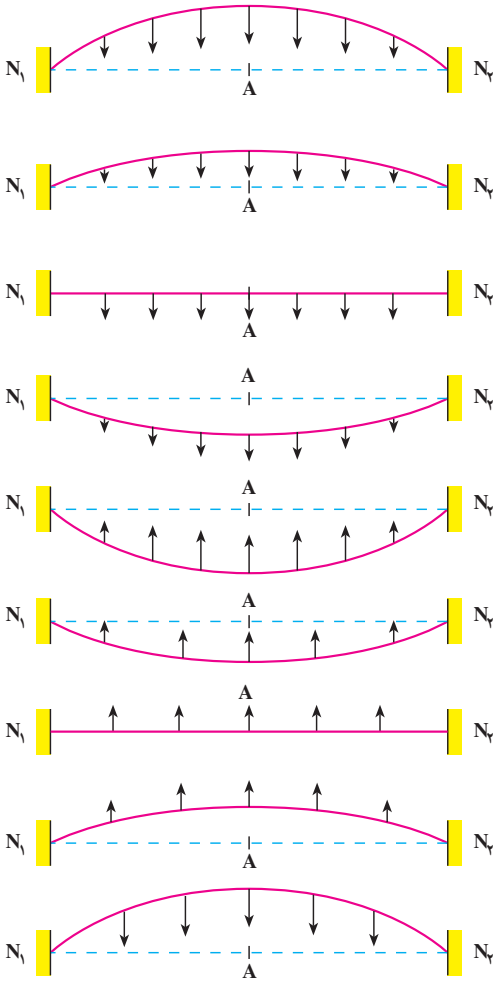
الف: دو سر طناب ثابت است: چون انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، در دو انتهای(دو سر) طناب، همواره گره ایجاد می‌شود. حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۴ وضعیت طناب را در لحظه‌های مختلف و در یک دوره نشان می‌دهد.

در این شکل‌ها خط‌چین N_1AN_2 ، وضعیت تعادل طناب را نشان می‌دهد.

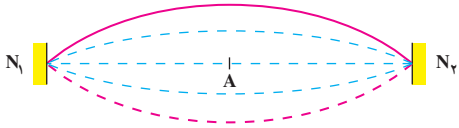
در شکل ۱ــ۱۵ حالت‌های مختلف شکل ۱ــ۱۴ نشان داده شده است.

اگر طول طناب L باشد، با توجه به آن‌چه که بیان شد، فاصله‌ی دو گره‌ی متوالی برابر نصف طول موج است. در این حالت می‌توان نوشت :

$$L = \frac{\lambda}{2} \qquad (۱ــ۳)$$



شکل ۱ــ۱۴



شکل ۱ــ۱۵

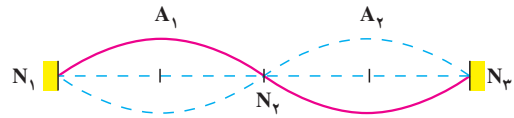
اگر بسامد نوسان f و سرعت انتشار موج در طناب v باشد، با استفاده از رابطه‌ی $\lambda = \frac{v}{f}$ خواهیم داشت :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

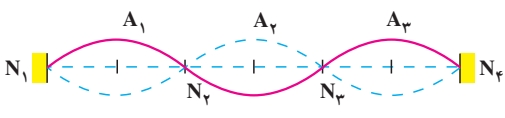
$$L = \frac{v}{f}$$

$$f_1 = \frac{v}{2L} \qquad (۱ــ۴)$$

در آلات موسیقی سیمی (زهی) مانند تار، ویلون و... ارتعاش‌های ایجاد شده توسط مضراب و یا آرشه و... در سیم منتشر می‌شود و از دو انتهای ثابتِ تار بازتاب می‌یابد که از برهم نهی آن‌ها در طول سیم موج ایستاده تشکیل می‌شود. اگر یک سیم (تار مرتعش)، به‌گونه‌ای مرتعش شود که مانند شکل ۱ــ۱۴ یک شکم در وسط و دو گره در طرفین آن تشکیل شود، گفته می‌شود که تار بسامد اصلی خود را تولید کرده است. این بسامد از رابطه‌ی ۱ــ۴ به‌دست می‌آید. یک طناب (یا یک تار) را می‌توان به‌گونه‌ای به نوسان درآورد که تعداد گره‌ها و شکم‌های تشکیل شده در طول آن از حالت اصلی بیش‌تر باشد. شکل‌های ۱ــ۱۶ و ۱ــ۱۷ وضعیت‌هایی را نشان می‌دهد که در آن‌ها به‌ترتیب دو و یا سه شکم تشکیل شده است.



شکل ۱ــ۱۶



شکل ۱ــ۱۷

با کمی دقت معلوم می‌شود که : وقتی روی طنابی موج ایستاده تشکیل می‌شود، در حالی که دو انتهای آن ثابت است، **طول طناب مضرب صحیحی از نصف طول موج است.**

$$L = n\frac{\lambda_n}{۲} \qquad (۵ــ۱)$$

$$n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

رابطه‌ی اخیر را می‌توان برحسب بسامد به‌صورت زیر نوشت :

$$f_n = \frac{nv}{۲L} = nf_۱ \qquad (۶ــ۱)$$

روشن است که به‌ازای $n = ۱$ ، بسامد اصلی به‌دست می‌آید. اگر $n = ۲$ باشد $(f_۲ = ۲f_۱)$ به آن هماهنگ و یا مُد دوم و به همین ترتیب سوم، چهارم و... گفته می‌شود.

مثال ۱ــ۱

دو سر طنابی ثابت شده است. وقتی طناب را به ارتعاش درمی‌آوریم، در آن موج ایستاده تشکیل می‌شود. اگر طول طناب ۶۰cm و در آن ۳ گره ایجاد شده باشد ؛ الف : طول موج و ب : بسامد نوسان طناب را به‌دست آورید. سرعت انتشار موج در طناب ۲۴۰m/s است.

پاسخ

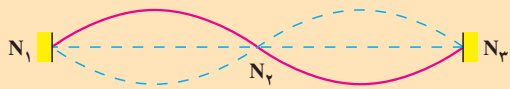
الف : شکل ۱ــ۱۸ وضعیت نوسانی طناب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل،

معلوم می‌شود که $n = ۲$ است. با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ ۵ داریم :

$$L = n\frac{\lambda_n}{۲}$$

$$۶۰ = ۲\frac{\lambda_۲}{۲}$$

$$\lambda_۲ = ۶۰cm$$



شکل ۱ــ۱۸

ب : با استفاده از رابطه‌ی $\lambda = \frac{v}{f}$ داریم :

$$۰/۶ = \frac{۲۴۰}{f}$$

$$f = ۴۰۰Hz$$

همان‌طور که دیدیم برای آن که در طول طناب موج ایستاده تشکیل شود، باید رابطه‌ی ۱ــ۵ برقرار شود. برای برقراری این رابطه می‌توان طول طناب و یا نیروی کششی طناب و درنتیجه سرعت انتشار موج در طناب را تغییر داد.

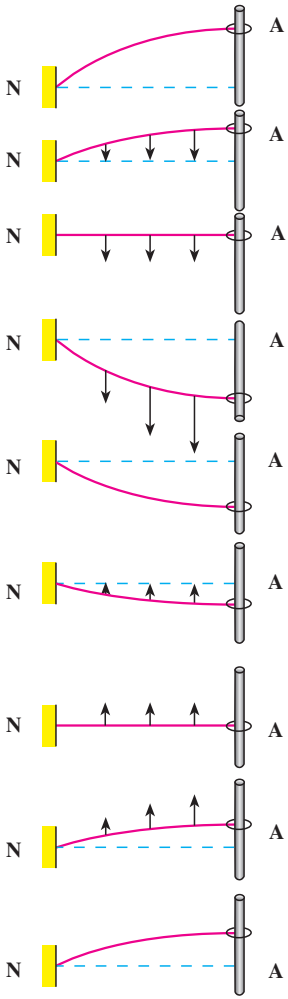
ب: یک سر طناب ثابت است: با توجه به آن‌چه در قسمت الف بیان شد، در انتهای ثابت طناب، گره و در انتهای آزاد آن، شکم تشکیل می‌شود. در ساده‌ترین حالت، بین ابتدا و انتهای طناب، گره و یا شکم دیگری به‌وجود نمی‌آید. در این حالت، شکل طناب مانند بخش‌های مختلف شکل ۱ــ۱۹ است. در این‌جا نیز ممکن است، بخش‌های مختلف شکل ۱ــ۱۹ را در یک شکل، مانند شکل ۱ــ۲۰ نشان داد.

چون فاصله‌ی یک گره و یک شکم متوالی برابر ربع طول موج است، اگر طول طناب برابر L و طول موج برابر λ باشد داریم :

$$L = \frac{\lambda}{۴} \qquad (۷ــ۱)$$

با استفاده از رابطه‌ی $\lambda = \frac{v}{f}$ داریم :

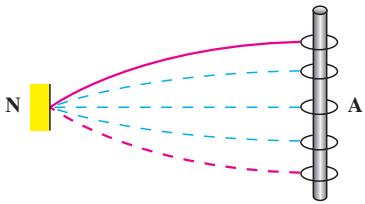
$$L = \frac{v}{۴f}$$



شکل ۱ــ۱۹

$$f_1 = \frac{v}{4L} \qquad (۸ــ۱)$$

رابطه‌ی بالا، بسامد اصلی طناب را به‌دست می‌دهد.

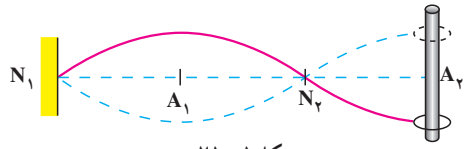


شکل ۱ــ۲۰

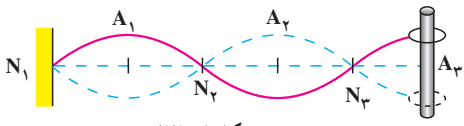
اگر در طول طناب، مانند شکل‌های ۱ــ۲۱ و ۱ــ۲۲، تعداد گره‌ها و شکم‌ها بیش‌تر باشد، داریم :

$$L = (2n-1)\frac{\lambda_{(2n-1)}}{4} \qquad (۹ــ۱)$$

$$n = 1, 2, 3, \ldots$$



شکل۱ــ۲۱



شکل۱ــ۲۲

یعنی در این حالت، طول طناب مضرب فردی از ربع طول موج است. با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۶ خواهیم داشت :

$$L = (2n-1)\frac{v}{4f_{(2n-1)}}$$

$$f_{(2n-1)} = (2n-1)\frac{v}{4L} = (2n-1)f_1 \qquad (۱۰ــ۱)$$

به ازای $n = 1$ در رابطه‌ی ۱ــ۱۰، بسامد اصلی و به ازای $n = 2, 3, \ldots$ هماهنگ‌های سوم، پنجم و... بسامد اصلی به‌دست می‌آیند. در این حالت (که یک سر طناب آزاد است) فقط مضرب‌های فرد بسامد اصلی در طناب و یا تار ایجاد می‌شوند.

مثال ۱ــ۲

در یک طناب موج ایستاده تشکیل شده است. یک سر طناب ثابت و سر دیگر آن آزاد است و در طول آن ۴ گره به وجود آمده است. اگر فاصله‌ی اولین گره از دومین شکم بعد از آن برابر ۱۵cm باشد :

الف : طول طناب را به‌دست آورید.

ب : اگر بسامد نوسان‌ها برابر ۴۰۰Hz باشد، سرعت انتشار موج در طناب را محاسبه کنید.

پاسخ

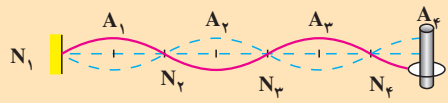
الف : در حالتی که یک سر طناب ثابت و سر دیگر آن آزاد است، تعداد گره‌ها برابر تعداد شکم‌هاست. در این حالت، n برابر تعداد گره (یا تعداد شکم) است.

فاصله‌ی اولین گره از دومین شکم بعد از آن با توجه به شکل زیر برابر N_1A_2 است :

$$N_1A_2 = ۱۵$$

$$۳\frac{\lambda}{۴} = ۱۵$$

$$\lambda = ۲۰cm$$



شکل ۱ــ۲۳

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۹ داریم :

$$L = (۲n-۱)\frac{\lambda_{(۲n_۱)}}{۴} \quad \text{و} \quad n = ۴$$

$$L = (۲\times ۴-۱)\times \frac{۲۰}{۴} = ۳۵cm$$

ب : چون $\lambda = \frac{v}{f}$ است داریم :

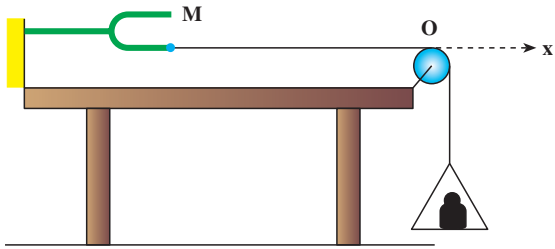
$$۰/۲ = \frac{v}{۴۰۰}$$

$$v = ۸۰m/s$$

مطالعه‌ی آزاد

اگر در آزمایشگاه دبیرستان شما، دیاپازونی با نوسان پایدار (مانند آن‌چه که پیشتر توضیح داده شد) موجود است، آزمایش زیر را انجام دهید و موج ایستاده را در طناب مشاهده کنید.

مطابق شکل ۱ــ ۲۴ یک سر طناب نازکی را به دیاپازون وصل کنید و سر دیگر آن را از روی قرقره‌ی ثابتی بگذرانید و به آن کفه‌ای آویزان کنید. وزن کفه و وزنه‌ی درون آن، نیروی کشش را در طناب ایجاد می‌کند. وقتی دیاپازون را به نوسان درمی‌آورید، در طناب موج ایجاد می‌شود. موج‌ها از انتهای ثابت O بازتاب می‌یابند و با موج‌های فرودی، برهم نهاده می‌شوند. با تغییر وزنه‌ی درون کفه، می‌توانید نیروی کشش طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج را در آن تغییر دهید. با این کار، بیش‌ترین مقدار وزنه را که به ازای آن در نقطه‌های O و M گره و در وسط آن‌ها شکم تشکیل می‌شود، به‌دست آورید. با کاهش وزنه‌ی درون کفه، حالت‌هایی را به‌وجود آورید که تعداد گره و شکم‌ها بیش‌تر شوند. با جایگزین کردن دیاپازونی که بسامد دیگری دارد چه تغییری در آزمایش رخ می‌دهد؟ نتیجه‌ی این آزمایش را چگونه توجیه می‌کنید؟

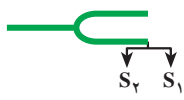


شکل ۱ــ۲۴

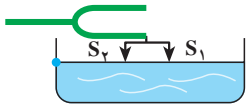
۱ــ۳ ــ برهم نهی موج‌ها در دو بُعد ــ تداخل موج‌ها در سطح آب

در بخش قبل، برهم نهی دو موج کاملاً یکسان را در طناب یا تار بررسی کردیم. در این بخش به بررسی برهم نهی موج‌هایی می‌پردازیم که در دو بُعد، مثلاً در سطح آب، منتشر می‌شوند.

با یک دیاپازون، دو چشمه‌ی موج S_1 و S_2 را ایجاد می‌کنیم (شکل ۱ــ۲۵). طول سوزن‌های S_1 و S_2 با هم برابرند.



شکل ۱ــ۲۵

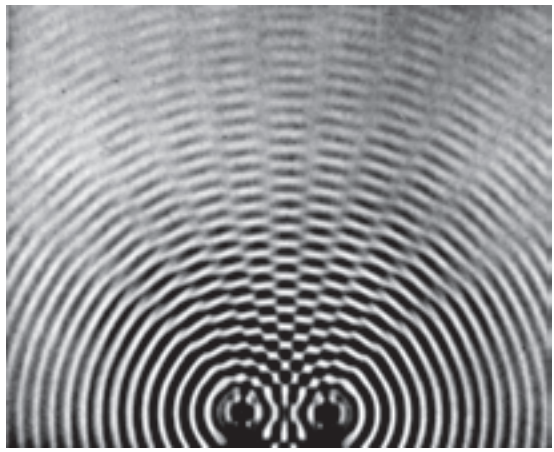


شکل ۱ــ۲۶

اکنون دیاپازون را مطابق شکل ۱ــ۲۶ با سطح آب درون تشتکی در تماس قرار می‌دهیم و برای جلوگیری از بازتاب موج از روی دیواره‌های تشتک، دور تا دور دیواره را اسفنج نازکی می‌چسبانیم. در این صورت، موج‌ها وقتی به دیواره می‌رسند، توسط اسفنج، جذب می‌شوند. حال اگر دیاپازون را به نوسان درآوریم، موج‌های دایره‌ای حاصل از هریک از دو چشمه‌ی S_1 و S_2 در سطح آب منتشر می‌شوند. در نتیجه به هر ذرّه‌ی آب که در سطح آب تشتک قرار دارد، هم‌زمان دو موج می‌رسد. بنابراین وضعیت نوسانی ذرّه‌های آب، حاصل برهم نهی دو موجی است که با هم به هر ذرّه می‌رسند. در این‌جا هم مانند تشکیل موج‌های ایستاده روی طناب، بعضی از ذرّه‌های سطح آب در هر لحظه دو موج دریافت می‌کنند که این دو موج می‌خواهند در هر ذرّه جابه‌جایی‌های هم‌اندازه اما در خلاف جهت یک‌دیگر ایجاد کنند، در نتیجه، برهم نهی دو موج در این نقاط، ویرانگر است و این ذرّه‌ها مانند گره‌ها، ساکن می‌مانند. مکان بعضی ذرّه‌ها طوری است که برهم نهی دو موجی که در هر لحظه به آن‌ها می‌رسند، سازنده است و ذرّه‌های واقع در این مکان‌ها مانند شکم‌ها در موج ایستاده روی طناب، با بیشینه‌ی دامنه، نوسان می‌کنند. در طناب که محیطی یک‌بُعدی است، تعدادی نقطه‌ی گره و شکم به طور متوالی تشکیل می‌شود، امّا در این‌جا که سطح آن دو بُعدی است، نقطه‌های گره مشابه و نیز نقطه‌های شکم مشابه بی‌شماری وجود دارد.

شکل ۱ــ۲۷ تصویری را نشان می‌دهد که حاصل برهم نهی آزمایشی مشابه آزمایش یادشده‌ی بالا است.

این پدیده را **تداخل موج‌ها** می‌نامیم. شرط ایجاد چنین وضعیتی، یعنی شرط ایجاد تداخل موج‌ها آن است که **دو چشمه‌ی موج، هم‌بسامد و هم‌فاز** باشند.


شکل ۱ــ۲۷